



①9 BUNDESREPUBLIK  
DEUTSCHLAND



DEUTSCHES  
PATENT- UND  
MARKENAMT

# Offenlegungsschrift DE 198 14 199 A 1

⑥1 Int. Cl.<sup>6</sup>:  
**H 01 S 3/10**  
H 01 S 3/083  
G 02 F 1/37

②1 Aktenzeichen: 198 14 199.8  
②2 Anmeldetag: 25. 3. 98  
④3 Offenlegungstag: 7. 10. 99

DE 198 14 199 A 1

⑦1 Anmelder:  
LAS - Laser Analytical Systems GmbH, 14532  
Stahnsdorf, DE  
  
⑦4 Vertreter:  
Patentanwälte Gulde Hengelhaupt Ziebig, 10785  
Berlin

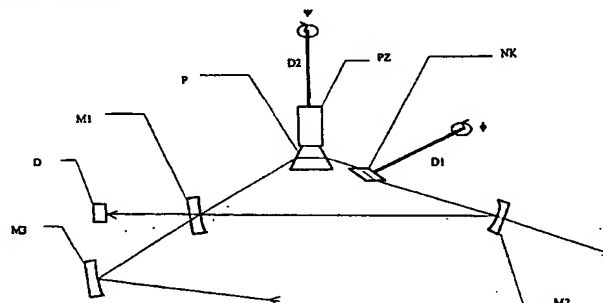
⑦2 Erfinder:  
Zanger, Eckhard, 12169 Berlin, DE; Müller, Ralf,  
10825 Berlin, DE; Gries, Wolfgang, 12159 Berlin, DE  
  
⑤6 Entgegenhaltungen:  
DD 1 45 588  
NL-Z.: Optics Communications, Vol. 53,  
No. 1, 1985, S. 43-47;

Die folgenden Angaben sind den vom Anmelder eingereichten Unterlagen entnommen

Prüfungsantrag gem. § 44 PatG ist gestellt

⑤4 Verfahren und Vorrichtung zur abstimmbaren Frequenzkonversion

⑤7 Die Erfindung bezieht sich auf ein Verfahren und eine Vorrichtung zur Resonanzverstärkung, insbesondere zur abstimmbaren Frequenzkonversion von insbesondere kontinuierlicher Laserstrahlung mit einem Resonator aus Spiegeln und mindestens einem brechenden Element. Die Aufgabe der Erfindung, ein gattungsgemäßes Verfahren und eine Vorrichtung zu entwickeln, mit denen insbesondere die Frequenzkonversion von insbesondere kontinuierlicher Laserstrahlung unter Vermeidung der beschriebenen Nachteile mit hoher Effizienz und mit denen über einen möglichst großen Wellenlängenbereich eine verbesserte Abstimbarkeit bezüglich der eingestrahlten Wellenlängen gewährleistet werden, wird dadurch gelöst, daß eine Resonatorlängenabstimmung durch Translation mindestens eines brechenden Elementes P vorgenommen wird. Der Resonator wird aus einem ersten Spiegel M1, aus einem zweiten Spiegel M2 und aus einem in Trapezform ausgeführten brechenden Element P, welches die Funktion eines Prismas ausübt, gebildet.



DE 198 14 199 A 1



## Beschreibung

Es sind bereits eine Vielzahl von Verfahren und Vorrichtungen bekannt, die eine Frequenzkonversion von kontinuierlicher Laserstrahlung mittels nichtlinearer Kristalle, insbesondere die Erzeugung der 2. Harmonischen, mit dem Ziel einer Erhöhung der Konversionseffizienz beschreiben.

Die "klassische Anordnung" zur Frequenzkonversion von Laserstrahlung, wie sie u. a. beschrieben ist in den Veröffentlichungen von M. Brieger et al. "Enhancement of Single Frequency SHG in a Passive Ring Resonator" Opt. Commun. 38 (1981) p. 423; C. S. Adams et al. "Tunable narrow line with ultra-violet light generation . . .", Opt. Commun. 90 (1992) p. 89; S. Bourzeix et al.: "Efficient frequency doubling of a continuous wave . . .", Opt. Commun. 99 (1993) p. 89, besteht aus einem Resonator in Form eines Doppel-Z, der aus vier Spiegeln gebildet wird, von denen mindestens zwei einen Krümmungsradius besitzen, und einem nichtlinearen Kristall. Ein erster Spiegel ist auf einem Piezoelement montiert und dient der Abstimmung der Resonatorlänge auf Resonanz mit der einfallenden Lichtwelle. Der von einem dritten Spiegel reflektierte Teil der eingestrahlten Welle wird mit einem Detektor registriert. Mit üblichen Verfahren (Hänsch-Couillaud, Pound-Drever) kann daraus ein Regelsignal zur aktiven Resonatorstabilisierung gewonnen werden. Die Spiegelabstände, Krümmungsradien, Beschichtungen sowie der Kristall sind so gestaltet, daß

- a) der Resonator optisch stabil ist,
- b) sich zwischen den gekrümmten zwei Spiegeln am Ort des nichtlinearen Kristalls eine Strahltaile ausbildet, deren Größe optimal für eine effiziente Konversion ist,
- c) der durch die gekrümmten Spiegel hervorgerufene Astigmatismus der zweiten Strahltaile zwischen weiteren zwei Spiegeln (dritter und vierter Spiegel), durch den Brewstergeschnittenen Kristall kompensiert wird,
- d) drei der Spiegel eine möglichst hohe Reflektivität für die Grundwelle besitzen,
- e) einer der Spiegel für die erzeugte Harmonische eine möglichst hohe Transmission besitzt,
- f) der Reflexionsgrad des Einkoppelspiegels so bemessen ist, daß die Resonanzüberhöhung der Grundwelle möglichst hoch ist, was bei Impedanzanpassung  $R = 1 - V$  (R: Reflexionsgrad, V: passive Resonatorverluste) der Fall ist,
- g) für den nichtlinearen Kristall die Bedingung für Phasenanpassung erfüllt ist.

Mit solchen Anordnungen werden typischerweise Konversionseffizienzen zwischen 10% und 30% erreicht. Da in dieser Anordnung vier justierbare Spiegelhalter benötigt werden, ist der mechanische Aufwand relativ hoch. Da hochreflektierende Spiegel immer eine Resttransmission aufweisen, können die passiven Verluste dieser Anordnung nicht beliebig reduziert werden, wodurch dem Verstärkungsfaktor des Resonators eine Obergrenze gesetzt ist.

Wird die Resonatorabstimmung wie in dieser Anordnung durch Translation eines Spiegels vorgenommen, so ergeben sich einige Nachteile: Die maximal zulässige Translation wird durch die zunehmende Dejustierung des Resonators durch den geänderten Strahlengang begrenzt. Eine zusätzliche Dejustierung erfolgt durch die bei üblichen Piezoelementen auftretende Verkipfung, die sich der Translationsbewegung überlagert. Einer kontinuierlichen Variation der eingestrahlten Lichtfrequenz kann der Resonator deshalb nur in einem begrenzten Frequenzintervall folgen (schnelle, konti-

nuierliche Frequenzdurchstimmung ist z. B. bei Laserkühlung von Atomen erforderlich).

Ein weiterer Nachteil der Spiegeltranslation tritt auf, wenn die Spiegel des Resonators zwecks Umrüstung auf einen anderen Wellenlängenbereich ausgetauscht werden sollen. Um dies ohne größeren Aufwand durchführen zu können, muß der Spiegel mittels einer Wechselfassung auf dem Piezoelement montiert werden, deren zusätzliche Masse die Regeldynamik für die Resonatorstabilisierung verschlechtert.

Für abstimmbare Frequenzkonversionssysteme werden meistens winklabgestimmte Kristalle verwendet, da sich mit diesen die größten Wellenlängenbereiche abdecken lassen. Bei Änderung der eingestrahlten Wellenlänge muß der Kristall gedreht werden, um weiterhin die Bedingung für Phasenanpassung zu erfüllen. Bei dieser Drehung erfährt der Laserstrahl im Resonator einen Parallelversatz, der ein Nachjustieren des Resonators erforderlich macht. Die Strahlage der erzeugten Harmonischen wird bei dieser Nachjustierung merklich geändert. Bei Anwendungen, die eine konstante Strahlage erfordern, muß diese mit Hilfe eines nachgeschalteten Ablenksystems, wie z. B. einem Periskop aus zwei justierbaren Spiegeln, anschließend wieder korrigiert werden.

In anderen Veröffentlichungen, so in der US 5,007,065, werden monolithische oder, wie in den US 5,027,361, 5,227,911, 4,731,787, 4,797,896 beschrieben, werden halbmonolithische Anordnungen benutzt.

Gegenüber den diskret aufgebauten Resonatoren haben diese Anordnungen verschiedene Vorteile:

- a) Sie sind mechanisch wesentlich stabiler und haben damit eine geringere Anfälligkeit gegen Störungen von außen.
- b) Sie haben weniger Verluste durch eine geringere Anzahl von Grenzflächen im Resonator.
- c) Teure präzisionsoptische Teile können entfallen.

Mit diesen Anordnungen werden Verdopplungseffizienzen bis zu 80% erreicht. Allerdings sind diese Anordnungen nur in sehr kleinen Wellenlängenintervallen abstimmbare und daher in der Anwendung auf Festfrequenzlaser, wie z. B. diodengepumpte Nd:YAG-Laser beschränkt. Eine nachträgliche Justierung oder Modifikation eines solchen Resonators ist nicht möglich. Bei einer teilweisen Beschädigung können einzelne Teile nicht oder nur unter hohem Aufwand ersetzt werden. Weiterhin ist die Herstellung der Kristalle, die den monolithischen bzw. halbmonolithischen Resonator bilden, sehr aufwendig (sphärisch geschliffene Oberflächen, spezielle Beschichtungen usw.). Diese Kristalle werden nicht auf dem Markt gehandelt und können nur in speziellen Labors hergestellt werden. Teilweise werden bei diesen Anordnungen auch Eigenschaften von Kristallen benutzt, die nur wenige Materialien erfüllen, wie zum Beispiel der hohe Koeffizient für den elektrooptischen Effekt beim Kristallmaterial Lithiumniobat, der zum Abstimmen des Resonators mit einer elektrischen Spannung benutzt wird. Die Beschränkung auf solche Kristalle führt dann zu einer starken Einschränkung des Wellenlängenbereiches, der damit verdoppelt werden kann.

In den US 5,052,815 und 5,357,537 werden diodengepumpte Ringlaser beschrieben, deren Resonator aus nur zwei Spiegeln und einem oder mehreren brechenden Elementen bestehen. Sie nutzen die Flexibilität eines diskreten Aufbaus, der auch nach der Assemblierung die Justierung von Einzelementen oder eine Modifikation durch Einbringen zusätzlicher optischer Elemente erlaubt. Die Resonatorverluste fallen durch die geringere Anzahl von Elementen



gegenüber klassischen Ringlasern geringer aus. Diese Vorteile werden genutzt, um Ringlaser mit besserer Effizienz und günstiger Herstellung zu realisieren. Alle dies Anordnungen enthalten ein aktives Lasermedium und werden explizit als Laseranordnung verwendet.

In einer weiteren bekannten Anordnung (M. Watanabe et al.: "Continuous-wave sum-frequency generation near 194 nm...", Opt. Commun. 97 (1993) p. 225) wird ein Prisma verwendet, um zwei verschiedene Wellenlängen gleichzeitig resonant zu verstärken. In diesem Fall wird die dispergierende Eigenschaft von Prismen genutzt, um zwei Laserstrahlen unterschiedlicher Wellenlängen zu vereinigen. Die beiden Laserstrahlen werden in zwei unabhängigen Resonatoren verstärkt, in deren gemeinsamem Zweig sich ein nichtlinearer Kristall befindet, der eine Summenfrequenz aus den beiden Laserstrahlen erzeugt.

Aufgabe der Erfindung ist es, ein gattungsgemäßes Verfahren und eine Vorrichtung zu entwickeln, mit denen die insbesondere Frequenzkonversion von insbesondere kontinuierlicher Laserstrahlung unter Vermeidung der beschriebenen Nachteile mit hoher Effizienz und mit denen über einen möglichst großen Wellenlängenbereich eine verbesserte Abstimmbarkeit bezüglich der eingestrahnten Wellenlängen gewährleistet werden. Bei der Verbesserung der Abstimmbarkeit sollen insbesondere

- der kontinuierliche Abstimmbereich vergrößert werden,
- der Vorgang des Nachstellens von Komponenten vereinfacht
- und die Zahl der auszutauschenden Komponenten verringert und der Austausch vereinfacht werden.

Die Lösung der Aufgabe ergibt sich aus den Merkmalen der Ansprüche 1 und 7. In den Unteransprüchen sind zweckmäßige Ausführungsformen angegeben.

Aus der Anwendung der Erfindung ergeben sich gegenüber den bekannten Anordnungen insbesondere die folgenden Vorteile:

1. Gegenüber dem klassischen 4-Spiegel-Aufbau besteht der Resonator aus weniger Elementen, wodurch die passiven Verluste verringert werden und die Konversionseffizienz erhöht wird.
2. Gegenüber dem klassischen 4-Spiegel-Aufbau ist eine wesentlich kompaktere Bauform realisierbar.
3. Durch den kompakteren Aufbau wird der Resonator unempfindlicher gegen äußere Störeinflüsse.
4. Kostenersparnis: Es werden nur 2 Präzisionspiegelhalter gegenüber 4 beim klassischen Resonator benötigt.
5. Durch die geringere Resonatorlänge gegenüber dem klassischen Aufbau wird der freie Spektralbereich des Resonators deutlich größer und damit erhöht sich auch die Akzeptanzbreite des Resonators (bei gleichbleibender Resonatorgüte) bezüglich der Frequenzbandbreite der einfallenden Strahlung. Daher können auch Laserstrahlquellen schlechterer Qualität mit dieser Anordnung konvertiert werden.
6. Gegenüber monolithischen und halbmonolithischen Anordnungen: Es werden nur Elemente verwendet, die auf dem Markt problemlos erhältlich und kostengünstig sind (bei Prisma und Kristall nur plane und unbeschichtete Flächen, Spiegel in Standard-Substratgrößen und Standard-Schichten).
7. Die Resonatorlängenabstimmung durch Translation des Prismas ermöglicht einen größeren Frequenzhub als bei Translation eines Spiegels.

8. Die Strahlversatzkompensation durch gegensinnige Drehung des Prismas vergrößert den Wellenlängenbereich, der ohne Nachjustierung des Resonators überdeckt werden kann.

9. Bei Abstimmung durch Komponentenaustausch müssen lediglich zwei Spiegel und der Kristall ausgetauscht werden. Die Halterungen können für diesen Zweck optimiert werden, ohne daß dafür Nachteile wie z. B. die Verschlechterung der Regeldynamik in Kauf genommen werden müssen.

Die Erfindung wird nachfolgend in mehreren Ausführungsbeispielen von Resonatoren-Anordnungen näher beschrieben. In der dazugehörigen Zeichnung zeigen:

Fig. 1 eine schematische Darstellung der "klassischen Anordnung",

Fig. 2 die schematische Darstellung einer Grundanordnung,

Fig. 3 die schematische Darstellung des Strahlengangs im Prisma,

Fig. 4 die schematische Darstellung einer ersten Ausführungsform nach der Erfindung,

Fig. 5 das Diagramm zur Darstellung des vertikalen Strahlversatzes bei einer durchstrahlten Prismenlänge von 10 mm,

Fig. 6 das Diagramm zur Darstellung des vertikalen Ablenkungswinkels durch Drehung des Prismas,

Fig. 7 das Diagramm zur Darstellung des horizontalen Ablenkungswinkels durch Drehung des Prismas,

Fig. 8 die schematische Darstellung der Anordnung mit exakter Kompensation und

Fig. 9 die schematische Darstellung der Anordnung mit Einkopplung über ein Prisma.

Besonderer Wert wird bei der Frequenzkonversion von kontinuierlicher Laserstrahlung nach der Erfindung auf die Abstimmbarkeit über einen möglichst großen Wellenlängenbereich gelegt. Bei der Abstimmung bezüglich der eingestrahnten Wellenlängen sind mehrere Fälle zu unterscheiden:

Fall 1: Die eingestrahlte Wellenlänge wird kontinuierlich um so kleine Beträge geändert, daß die Phasenanpassung für den Kristall erhalten bleibt, d. h. lediglich die Resonatorlänge muß nachgestellt werden, während der Kristall nicht gedreht werden muß. Die Wellenlängenänderungen sind in diesem Fall typischerweise kleiner als 1 nm.

Fall 2: Die eingestrahlte Wellenlänge wird um Beträge geändert, die ein Nachstellen des Kristalls oder anderer Komponenten erforderlich machen, nicht jedoch einen Austausch von optischen Komponenten. Hier handelt es sich um Änderungen in der Größenordnung 50 nm.

Fall 3: Die eingestrahlte Wellenlänge wird um Beträge geändert, die einen Komponentenaustausch (Spiegel, Kristall) erforderlich machen. Hierbei geht es um Änderungen, die größer als 50 nm sind und bis zu 1000 nm betragen können.

Die angestrebte Verbesserung der Abstimmbarkeit eines solchen Frequenzkonversionssystems bezieht sich auf alle drei Fälle. Im Fall 1 soll der kontinuierliche Abstimmbereich vergrößert werden. Im Fall 2 soll der Vorgang des Nachstellens von Komponenten vereinfacht werden, wodurch die Möglichkeit einer automatisierten (motorischen) Abstimmung geschaffen wird. Im Fall 3 soll die Zahl der auszutauschenden Komponenten verringert werden und der Austausch in der Handhabung möglichst vereinfacht werden.

Entsprechend der Darstellung in der Fig. 2 wird in der Grundanordnung ein Resonator aus Spiegeln M1 und M2



und aus einem brechenden Element P gebildet.

Das brechende Element P hat die Funktion eines Prismas, wird aber zur einfacheren Montage und wegen der geringeren Masse in Trapezform ausgeführt (im folgenden der Einfachheit halber trotzdem Prisma genannt). Da keiner der Spiegel M1, M2 zur Resonatorabstimmung benutzt wird, können beide ohne Rücksicht auf ihre Massenträgheit in leicht erhältlichen Standardgrößen ausgeführt werden. Die Spiegelhalter können in Hinblick auf einfache Austauschbarkeit der Spiegel M1, M2 optimiert werden.

Das Prisma aus hochtransparentem Material (vorzugsweise Suprasil) erhält keine Beschichtung. Der Winkel der brechenden Flächen zueinander wird so gewählt, daß Ein- und Austritt des Strahls unter Brewsterwinkel bzw. nahe Brewsterwinkel erfolgt. Bei Suprasil ergeben sich für einen Scheitelwinkel von 69° im Wellenlängenbereich 400 nm bis 1000 nm Reflexionsverluste kleiner als 0.01%. Das Prisma wird ohne Fassung direkt auf ein Piezoelement PZ angebracht, da ein Austausch des Prismas bei Wechsel des Wellenlängenbereiches nicht notwendig ist. Um die bewegte Masse möglichst gering zu halten, erfolgt die Befestigung des Prismas vorzugsweise durch Klebung.

Wie aus der Fig. 3 hervorgeht, ändert sich der Strahlengang im Resonator nicht, wenn das Prisma in Richtung seiner Symmetrieachse translatiert wird. Maßgeblich für die Resonatorabstimmung ist die optische Weglänge. Wird das Prisma um den Betrag  $\Delta y$  in Richtung seiner Symmetrieachse bewegt, ändert sich die optische Weglänge um

$$\Delta L = 2\Delta y(n \sin 2\alpha - 1) \approx 0.7\Delta y.$$

(n: Brechungsindex Prisma,  $\alpha$ : Einfallswinkel)

Wegen des symmetrischen Strahlenganges im Prisma liegt hier das Minimum der Ablenkung vor. Daher wirken sich Verkipnungen des Prismas erst in zweiter Näherung auf den Strahlengang im Resonator aus. Diese beiden Eigenschaften der Anordnung ermöglichen einen wesentlich größeren Abstimmereich nach Fall 1, da hiermit größere Translationswege realisierbar sind, ohne den Resonator zu dejustieren.

Bei der bevorzugten Ausführungsform nach Fig. 4 dient der Spiegel M1 als Einkoppelspiegel. Die Reflektivität bei der Grundwellenlänge wird so gewählt, daß Impedanzanpassung ( $R = 1 - V$ , V: passive Verluste) vorliegt. Der Spiegel M2 dient als Auskoppelspiegel und wird daher auf der Grundwellenlänge hochreflektierend, und auf der Wellenlänge der erzeugten Harmonischen hochtransmittierend ausgeführt. Die Frequenzkonversion wird mit einem brewstergeschnittenen, winkelabgestimmten nichtlinearen Kristall NK vorgenommen, der sich zwischen dem Prisma P und dem Auskoppelspiegel M2 befindet. Zur Winkelabstimmung wird der Kristall um eine Achse D1 gedreht, die in der Ringebene liegt und senkrecht zum Strahlengang innerhalb des Kristalls steht. Der entstehende Strahlversatz bei Drehung des Kristalls kann bei kleinen Winkeln durch eine gegensinnige Drehung des Prismas kompensiert werden. Das Prisma wird dabei um seine Symmetrieachse D2 gedreht. Da bei dem gewählten Strahlengang das Minimum der Ablenkung vorliegt, bewirkt eine Drehung des Prismas in erster Näherung lediglich einen Strahlversatz, jedoch keine Richtungsablenkung. Die Ergebnisse numerischer Berechnungen des Strahlversatzes und der Ablenkwinkel, die durch die Drehung des Prismas hervorgerufen werden, sind in den Fig. 5, 6 und 7 graphisch dargestellt. Um Kompensation zu erreichen, muß der Drehwinkel  $\psi$  für das Prisma der Beziehung

$$\psi = \frac{n_k d_k}{n_p d_p} \phi$$

genügen, wobei  $\Phi$  der Drehwinkel des Kristalls,  $n_k$  und  $n_p$  die Brechungsindizes von Kristall bzw. Prisma,  $d_k$  und  $d_p$  die Weglängen im Kristall bzw. im Prisma bedeuten. Eine einfache mechanische Kopplung der Kristalldrehung mit der Prismendrehung gemäß der angegebenen Beziehung ermöglicht daher eine Winkelabstimmung des Kristalls ohne gleichzeitig den Resonator zu dejustieren. Da die Prismendrehung in zweiter Näherung eine Strahlablenkung bewirkt, ist dies nur für einen beschränkten Winkelbereich möglich. In der weiter unten beschriebenen Anordnung mit einem zusätzlichen Kompensatorelement kann dagegen exakte Kompensation erreicht werden, die jedoch mit erhöhten Resonatorverlusten erkauft werden muß.

Die Resonatoranordnung nach Fig. 4 enthält vier Elemente, die astigmatische Verzerrungen hervorrufen: Die gekrümmten Spiegel M1 und M2, das Prisma P sowie der nichtlineare Kristall NK. Die von den Spiegeln hervorgerufenen Astigmatismen unterscheiden sich dabei im Vorzeichen von denen des Prismas und des Kristalls. Dieses gegensätzliche Vorzeichen wird in der klassischen Anordnung nach Fig. 1 benutzt, um den Astigmatismus derjenigen Strahlteile des Resonators, auf die der eingekoppelte Strahl idealerweise unter mode-matching-Bedingungen abgebildet wird, zu kompensieren. Das ist erforderlich, um die gesamte Leistung eines Laserstrahls mit beugungsbegrenztem, rundem Gaußprofil (TEM<sub>00</sub>-Mode) in die Grundmode des Resonators einkoppeln zu können. Im Fall des hier beschriebenen Resonators ist eine vollständige Astigmatismuskompensation wegen der verringerten Anzahl von Freiheitsgraden nicht möglich. Die Kompensation des Astigmatismus erfolgt daher teilweise außerhalb des Resonators über einen sphärisch gekrümmten Spiegel M3 (siehe Fig. 4). Dies bedeutet keinen höheren Aufwand als sonst, da zur exakten Abbildung des eingekoppelten Laserstrahls ohnehin ein justierbares Ablenssystem, wie z. B. ein aus zwei Spiegeln bestehendes Periskop, benötigt wird. Anstelle der sonst verwendeten Planspiegel wird in diesem Fall einer der Periskopspiegel als Hohlspiegel ausgeführt.

Grundsätzlich kann in der beschriebenen Anordnung auch ein kubisch geschnittener, nichtlinearer Kristall unter senkrechtem Lichteinfall verwendet werden, dessen Ein- und Austrittsflächen mit entsprechenden Antireflexbeschichtungen versehen sind. In diesem Fall sind etwas höhere Konversionseffizienzen möglich, da die Verluste der erzeugten Harmonischen an der Austrittsseite des Kristalls geringer ausfallen. Ob damit ein Effizienzgewinn erreicht wird, ist jedoch stark von der Qualität der verwendeten Antireflexschichten abhängig. Zudem entstehen durch die notwendigen Antireflexbeschichtungen zusätzliche Kosten.

In einer weiteren Ausführungsform nach Fig. 8 wird eine zusätzliche planparallele Platte K aus hochtransparentem Material (vorzugsweise Suprasil) unter Brewsterwinkel in den Strahlengang gebracht. Der Strahlversatz durch den nichtlinearen Kristall NK wird in dieser Anordnung durch gegensinnige Drehung der planparallelen Platte kompensiert, wogegen das Umlenkprisma P nicht bewegt wird. Ansonsten entspricht die Anordnung der nach Fig. 4. Da die planparallele Platte K ebenso wie der nichtlineare Kristall NK bei Drehung um die Achse D2 bzw. D1 keinerlei Winkelablenkung des Strahls bewirkt, kann der Strahlversatz des Kristalls bei geeignetem Drehwinkel und Drehsinn exakt kompensiert werden. Der nutzbare Wellenlängenbereich bei Abstimmung nach Fall 2 (s. o.) ist dadurch nur noch



durch die erhöhten Verluste bei Abweichung vom Brewsterwinkel begrenzt. Die Vergrößerung des Abstimmereiches nach Fall 2 gegenüber der Anordnung in Fig. 4 hat allerdings den Nachteil etwas höherer Verluste, die durch das zusätzliche Element hervorgerufen werden. Wie in der vorher beschriebenen Anordnung kann auch hier ein kubisch geschnittener Kristall mit Antireflexbeschichtungen verwendet werden, um die Auskoppelverluste der erzeugten Harmonischen zu verringern. In diesem Fall empfiehlt es sich, die Kompensatorplatte ebenfalls unter senkrechtem Einfall und mit Antireflexbeschichtungen zu verwenden, um eine exakte Kompensation zu gewährleisten. Eine weitere mögliche Variante ist die Kompensation durch einen zweiten, spiegelsymmetrisch angeordneten Kristall vorzunehmen. Diese Anordnung hat den Vorteil daß der effizienzminimierende walk-off-Winkel des Kristalls ebenfalls kompensiert wird.

Bei der Ausführungsform nach Fig. 9 wird der Grundwellenstrahl nicht über den Spiegel M1, sondern über eine der (unbeschichteten) Prismenflächen eingekoppelt. Im Unterschied zu den Anordnungen nach Fig. 4 und 8 wird hier der Scheitelwinkel des Prismas so gewählt, daß der Einfallswinkel an der Einkoppelfläche des Prismas kleiner als der Brewsterwinkel und der Einfallswinkel an der anderen Prismenfläche gleich dem Brewsterwinkel ist. Der genaue Wert für den Scheitelwinkel bestimmt sich aus der Bedingung für Impedanzanpassung: Der durch die Fresnellbeziehungen bestimmte Reflexionsgrad  $R$  der Einkoppelfläche für den eingekoppelten Strahl soll den passiven Verlusten  $V$  des Resonators entsprechen ( $R = V$ ). Verwendet man ein handelsübliches, gleichseitiges Prisma aus Quarz (Scheitelwinkel  $60^\circ$ ), so ergibt sich ein Reflexionsgrad von etwa 1.3%. Dies entspricht in etwa dem Wert für die passiven Verluste, die üblicherweise bei diesen Resonatoren erreicht werden. Durch die Verwendung von unbeschichteten Standardprismen kann daher das Einkoppelement äußerst kostengünstig realisiert werden. Zudem ist dieses Einkoppelement nahezu achromatisch, da sich der Reflexionsgrad über groß Wellenlängenbereiche kaum ändert. Da der nutzbare Wellenlängenbereich eines Spiegelsatzes im wesentlichen durch die teilreflektierende Einkoppelschicht bestimmt wird, deren Wellenlängenbereich grundsätzlich kleiner ist als bei hochreflektierenden Schichten, kann mit der hier beschriebenen Anordnung der nutzbare Wellenlängenbereich eines Spiegelsatzes vergrößert werden. Die Resonatorabstimmung erfolgt hier zweckmäßigerweise durch Translation des Spiegels M1, da die gleichzeitige Verwendung als Einkoppelement und als Abstimmelement Platzprobleme verursacht. Außerdem sind die Vorteile der Prismentranslation hier nicht mehr in vollem Umfang vorhanden. Ansonsten entspricht diese Anordnung der nach Fig. 8. Nachteilig bei der Anordnung nach Fig. 9 gegenüber der Anordnung in Fig. 8 ist die schwierigere Justierung. Das Prisma muß in diesem Fall justierbar gehalten werden, da es sowohl den Strahlengang im Resonator als auch die Strahlage des eingekoppelten Strahls beeinflußt. Eine iterationsfreie und unabhängige Justierung von eingekoppeltem Strahl und Resonator, wie sie bei den Anordnungen nach Fig. 4 und 8 vorliegt, ist in dieser Anordnung nicht möglich.

Die genaue Form von Kristall und Kompensator kann hier natürlich ebenso wie bei der zuvor beschriebenen Anordnung variiert werden (kubischer Kristall, zwei Kristalle).

Die Erfindung ist nicht auf die hier beschriebenen Ausführungsformen beschränkt. Vielmehr ist es möglich, durch Kombination der Merkmale weitere Ausführungsbeispiele zu realisieren, ohne den Rahmen der Erfindung zu verlassen.

# Bezugszeichenliste

- D1 Achse
- D2 Achse
- 5 K Platte
- M1 Spiegel
- M2 Spiegel
- M3 Spiegel
- NK nichtlinearer Kristall
- 10 P brechendes Element

## Patentansprüche

1. Verfahren zur Resonanzverstärkung, insbesondere zur abstimmbaren Frequenzkonversion von insbesondere kontinuierlicher Laserstrahlung, mit einem Ringresonator aus Spiegeln und mindestens einem brechenden Element, **dadurch gekennzeichnet**, daß eine Resonatorlängenabstimmung durch Translation mindestens eines brechenden Elements (P) vorgenommen wird.
2. Verfahren nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß das brechende Element (P) in der Funktion eines Prismas in den Strahlengang eingebracht wird.
3. Verfahren nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß eine Resonatorlängenabstimmung durch Translation eines in Trapezform ausgeführten brechenden Elements (P) vorgenommen wird.
4. Verfahren nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß die Frequenzkonversion mit einem winkelausgestimmten nichtlinearen Kristall (NK) vorgenommen wird, der sich zwischen dem brechenden Element (P) und einem Auskoppelspiegel (M2) befindet, und der zur Phasenanpassung um eine Achse (D1) gedreht wird, die in der Ringebeine liegt und eine senkrechte Komponente zum Strahlengang innerhalb des Kristalls (NK) besitzt, und dessen Strahlversatz durch eine zur Drehung des Kristalls (NK) gegensinnige Drehung des brechenden Elementes (P) um seine Symmetrieachse (D2), kompensiert wird.
5. Verfahren nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß eine zusätzliche planparallele Platte (K) aus hochtransparentem Material unter Brewsterwinkel in den Strahlengang gebracht wird, und daß der Strahlversatz durch den nichtlinearen Kristall (NK) durch gegensinnige Drehung der Platte (K) um eine Achse (D2), die in Ringebeine liegt, kompensiert wird, wobei das brechende Element (P) nicht bewegt wird.
6. Verfahren nach Anspruch 4, dadurch gekennzeichnet, daß der Grundwellenstrahl über eine der unbeschichteten Flächen des brechenden Elementes (P) eingekoppelt wird und daß die Resonatorabstimmung durch Translation eines der Spiegel (M1) vorgenommen wird.
7. Vorrichtung zur Resonanzverstärkung, insbesondere zur abstimmbaren Frequenzkonversion von insbesondere kontinuierlicher Laserstrahlung, unter Verwendung von Spiegeln und mindestens einem brechenden Element, **dadurch gekennzeichnet**, daß der Resonator aus einem ersten Spiegel (M1), aus einem zweiten Spiegel (M2) und aus einem in Trapezform ausgeführten brechenden Element (P), welches die Funktion eines Prismas ausübt, gebildet ist.
8. Vorrichtung nach Anspruch 7, dadurch gekennzeichnet, daß die Krümmungsradien der Spiegel (M1, M2) und die Abstände der Resonatorelemente so gewählt sind, daß der hierdurch gebildete Resonator optisch stabil ist, und daß der Reflexionsgrad des Einkop-



pelspiegels (M1) so bemessen ist, daß Impedanzanpassung vorliegt und daß der Auskoppelspiegel (M2) auf der Grundwellenlänge hochreflektierend und auf der konvertierten Wellenlänge transparent ist.

9. Vorrichtung nach den Ansprüchen 7 und 8, dadurch gekennzeichnet, daß das brechende Element (P) ohne Fassung direkt auf ein Piezoelement (PZ) aufgebracht, insbesondere aufgeklebt ist. 5

10. Vorrichtung nach den Ansprüchen 7 bis 9, dadurch gekennzeichnet, daß das brechende Element (P) aus hochtransparentem Material ohne Beschichtung besteht, wobei der Winkel der brechenden Flächen zueinander so gewählt ist, daß der Ein- und Austritt des Strahls nahe Brewsterwinkel erfolgt. 10

11. Vorrichtung nach den Ansprüchen 7 bis 10, dadurch gekennzeichnet, daß der erste Spiegel (M1) als Einkoppelspiegel und der zweite Spiegel (M2) als Auskoppelspiegel beschichtet ist, und daß zwischen dem brechenden Element (P) und dem Auskoppelspiegel (M2) ein brewstergeschnittener, winkelabgestimmter nichtlinearer Kristall (NK) angeordnet ist. 15 20

12. Vorrichtung nach Anspruch 11, dadurch gekennzeichnet, daß zur Kompensation des Astigmatismus ein sphärisch gekrümmter Spiegel (M3) außerhalb des Resonators angeordnet ist. 25

13. Vorrichtung nach Anspruch 12, dadurch gekennzeichnet, daß der sphärisch gekrümmte Spiegel (M3) aus einem vorhandenen als Hohlspiegel ausgebildeten Periskopspiegel eines Ablenssystems gebildet ist. 30

14. Vorrichtung nach den Ansprüchen 7 bis 12, dadurch gekennzeichnet, daß ein kubisch geschnittener, nichtlinearer Kristall unter senkrechtem Lichteinfall angeordnet ist, dessen Ein- und Austrittsflächen mit Antireflexbeschichtungen versehen sind. 35

15. Vorrichtung nach den Ansprüchen 7 bis 12, dadurch gekennzeichnet, daß eine planparallele Platte (K) aus hochtransparentem Material unter Brewsterwinkel in den Strahlengang gebracht ist. 40

16. Vorrichtung nach den Ansprüchen 7 bis 11 und 15, dadurch gekennzeichnet, daß die planparallele Platte (K) unter senkrechtem Lichteinfall angeordnet und mit Antireflexbeschichtungen versehen ist. 45

17. Vorrichtung nach den Ansprüchen 7 bis 11, dadurch gekennzeichnet, daß ein zum ersten Kristall (NK) spiegelsymmetrisch angeordneter zweiter Kristall vorgesehen ist. 50

18. Vorrichtung nach den Ansprüchen 7 und 15, dadurch gekennzeichnet, daß der Scheitelwinkel des brechenden Elementes (P) so gewählt ist, daß der Einfallswinkel an der Einkoppelfläche kleiner als der Brewsterwinkel und der Einfallswinkel an der anderen Fläche gleich dem Brewsterwinkel ist, wobei das Piezoelement (PZ) an dem ersten Spiegel (M1) angeordnet ist. 55

19. Vorrichtung nach einem der Ansprüche 7 bis 18, dadurch gekennzeichnet, daß die Kristalle (NK), das brechende Element (P) und die planparallele Platte (K) drehbar angeordnet sind. 60

---

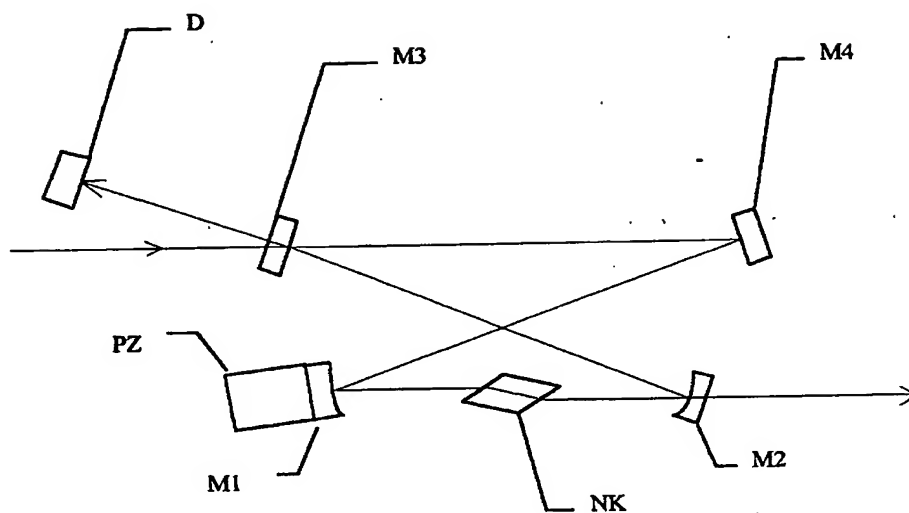
Hierzu 6 Seite(n) Zeichnungen

---

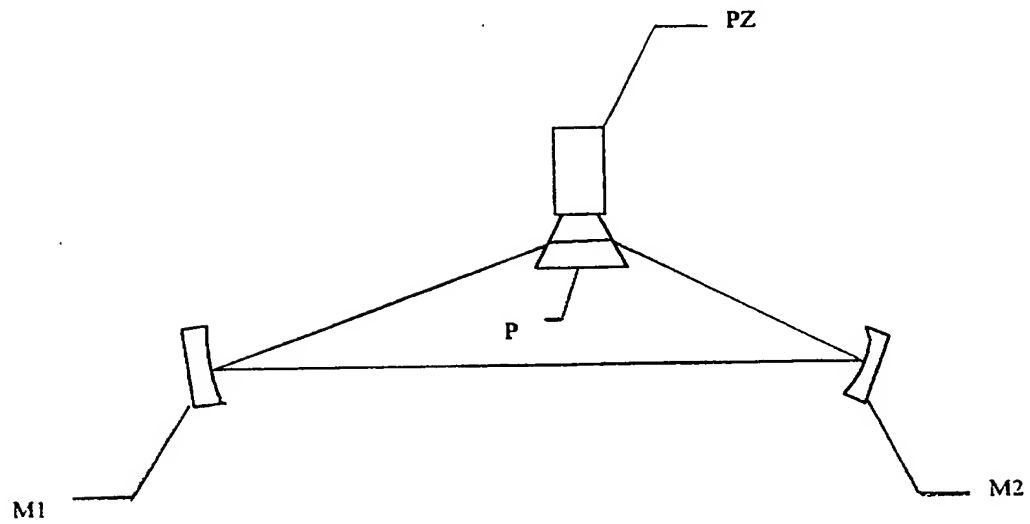
60

65





**Fig. 1**



**Fig. 2**



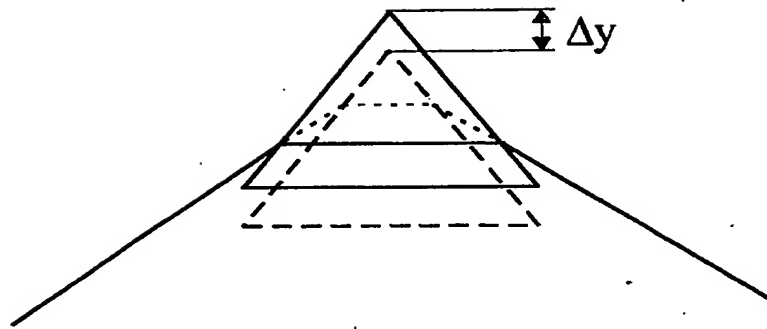


Fig. 3

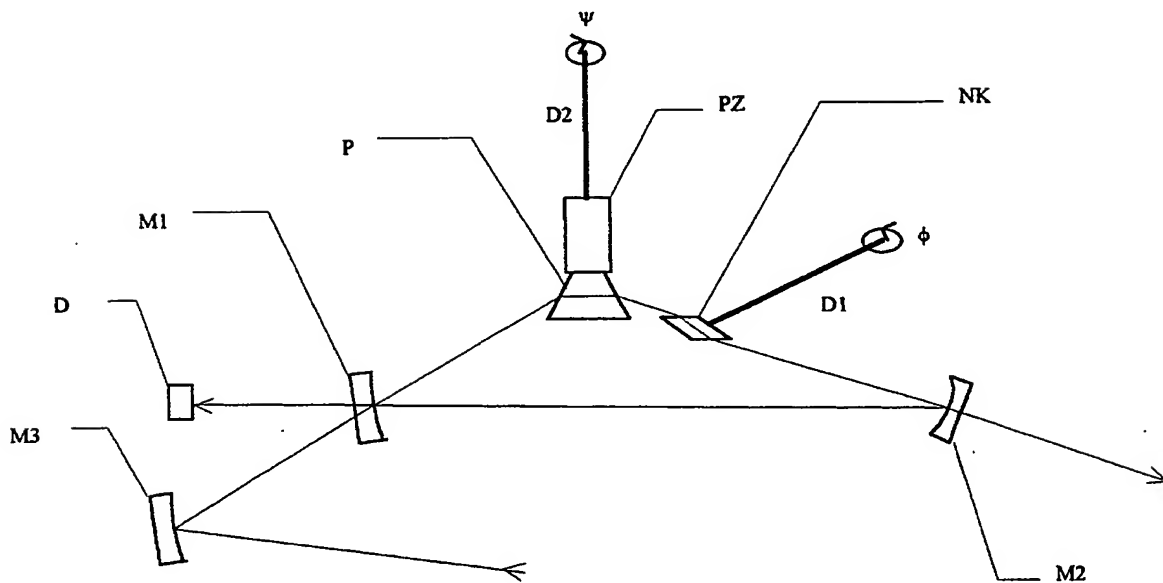
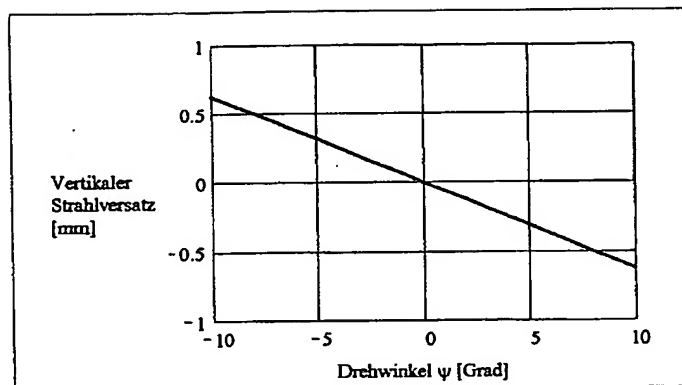
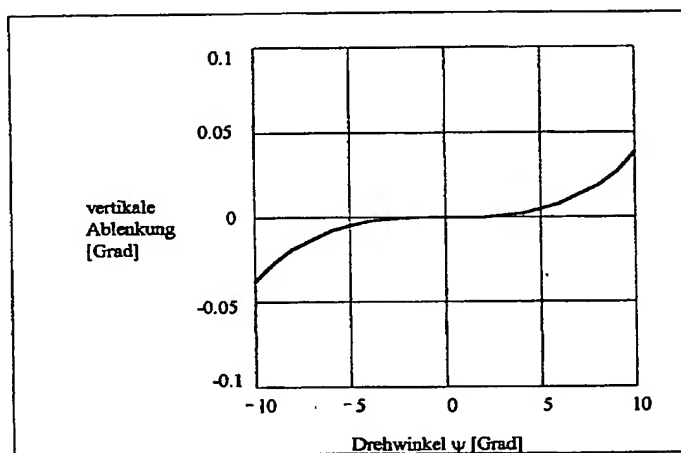


Fig. 4



**Fig. 5**



**Fig. 6**

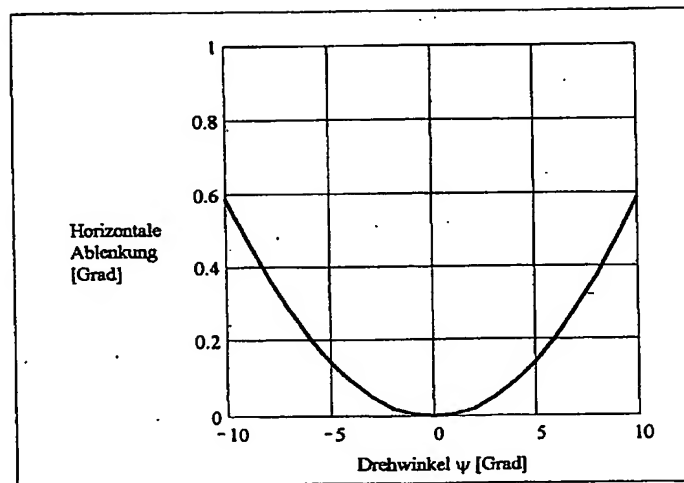


Fig. 7

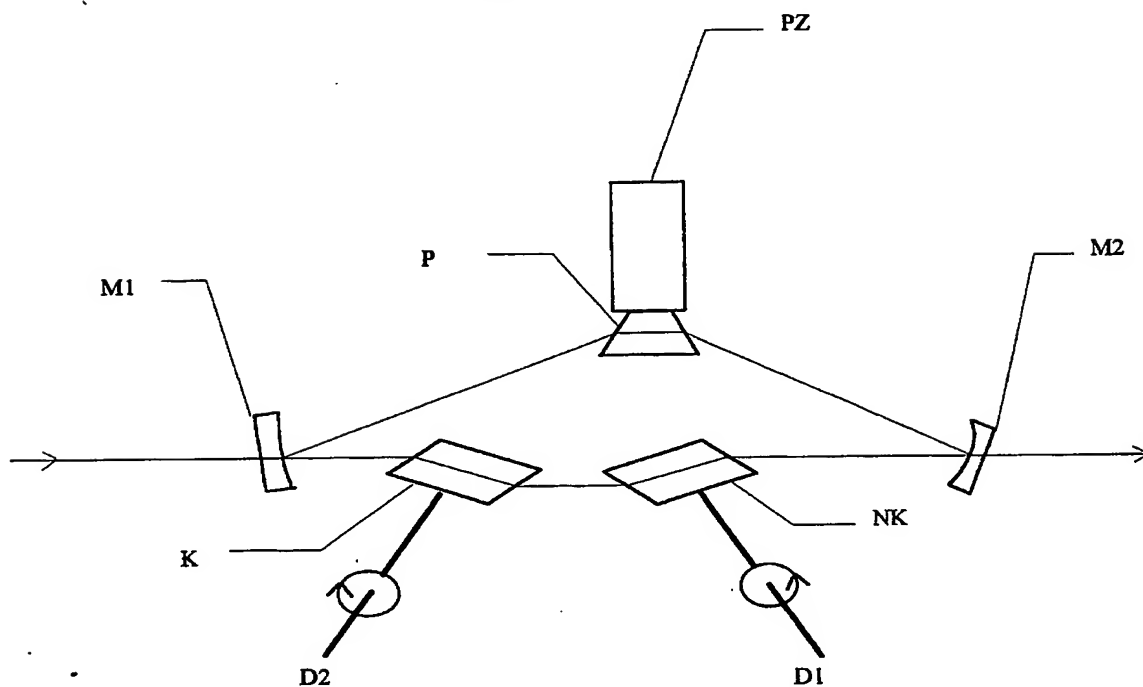
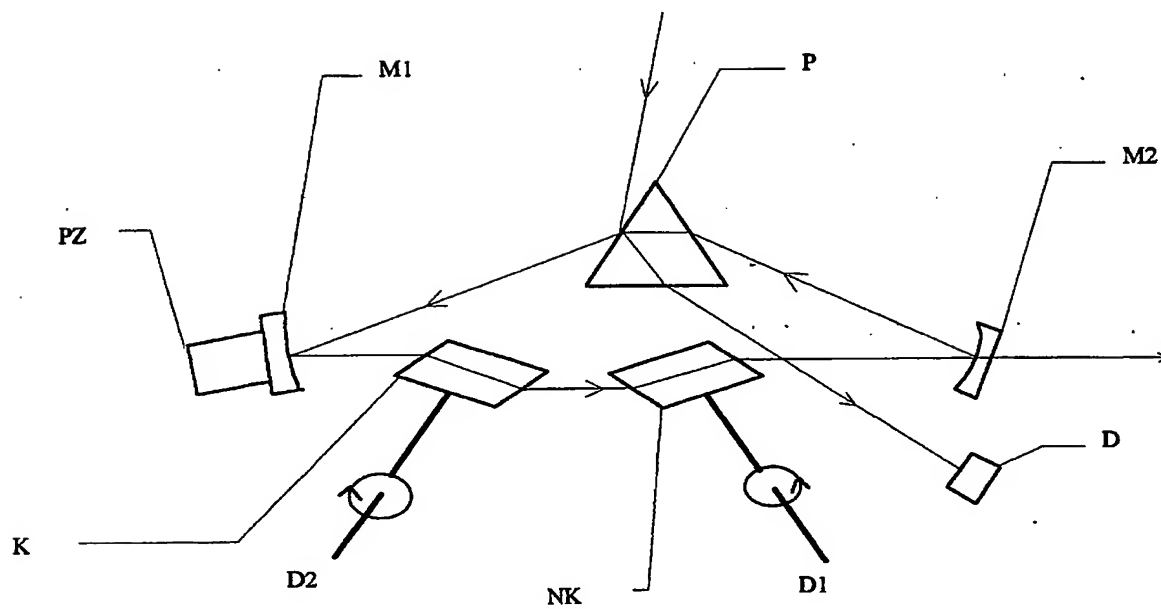


Fig. 8



**Fig. 9**